

I N T E R V I S T E

Conversazione con Alessandro Minelli

Il labirinto delle forme possibili

Domenica Bruni

*Alessandro Minelli, già professore ordinario di Zoologia all'Università di Padova, è uno dei ricercatori più attivi nel campo della biologia evuzionistica dello sviluppo (evo-devo). È autore di volumi fondamentali come *The Development of Animal Form* (Cambridge University Press, 2003) e *Perspectives in Animal Phylogeny and Evolution* (Oxford University Press, 2009). Nel 2007 ha pubblicato presso Einaudi il saggio *Forme del divenire*, uscito due anni dopo in traduzione inglese per Princeton University Press. È socio nazionale dell'Accademia Nazionale delle Scienze*

detta dei XL. Ha ricevuto la medaglia per le Scienze Fisiche e Naturali assegnata per l'anno 2002 dalla stessa Accademia e il premio Ferrari-Soave assegnato nel 2005 dall'Accademia delle Scienze di Torino per la Biologia Animale.

1. Il tuo nome è legato da alcuni anni all'espressione "evo-devo", ossia alla biologia evuzionistica dello sviluppo. Ma i tuoi lavori testimoniano che da sempre sei stato particolarmente attento ai problemi teorici e storici della biologia. Puoi raccontarmi il periodo della tua formazione e come è nata la passione teorica per evo-devo?

Come a tutte le domande attorno alle origini, credo che alla tua domanda mi convenga rispondere in forma di racconto.

C'era una volta, nei primi anni Sessanta dello scorso secolo, un ragazzo appassionato di piante e di animali, che passava le sue ore a raccogliere e classificare insetti, a curiosare sulle regolarità geometriche dei fiori e sulla disposizione delle foglie lungo il fusto delle piante e a seguire le metamorfosi dei piccoli animali che teneva in casa, in rudimentali acquari...

Per dirla in breve: ero affascinato dalla diversità delle forme viventi e sognavo di potere un giorno ricondurla ad un piccolo numero di principi, di leggi dei cambiamenti possibili. Naturalmente, non solo non avevo alcuno strumento per fare progressi in tale direzione, ma non era nemmeno chiaro se e dove ne avrei mai potuto trovare. Eppure, negli studi che avrei condotto qualche decennio più tardi hanno sempre avuto un posto importante alcune cose che avevo imparato, o intuito, in quegli anni. Accennerò a tre storie.

Negli anni del ginnasio e del liceo frequentavo un anziano entomologo, che non aveva seguito corsi universitari di materie scientifiche ma aveva un'ottima conoscenza degli insetti, e non solo, acquisita attraverso decenni di osservazioni. Da lui imparai che in natura ci sono cambiamenti facili, che possono tranquillamente avvenire all'interno di una specie, e cambiamenti difficili, improbabili, anche se il salto fra una condizione e l'altra può sembrare una cosa da poco. Una coccinella arancione con un paio di macchie scure e una coccinella scura con sei macchie arancione possono benissimo appartenere alla stessa specie e ritrovarsi in una stessa popolazione, ma due coccinelle di color arancione, entrambe con sette macchie scure, delle quali però due sono in posizione diversa fra un esemplare e l'altro, appartengono di sicuro a specie diverse. In altri termini, è facile 'inchiostrare' le elitre con quantità diverse di pigmento scuro, ma è

molto più difficile modificare un'architettura, un insieme di relazioni tra punti.

Il secondo episodio riguarda le libellule, delle quali avevo imparato a identificare sia gli adulti sia le larve acquatiche, ma mi ero presto convinto che per capire l'evoluzione di questi insetti sarebbe stato necessario confrontare tra loro non già gli adulti delle diverse specie e, separatamente, le loro larve, bensì i processi di sviluppo attraverso i quali la larva di ciascuna specie si trasforma nel rispettivo adulto. A parole (ma solo a parole) siamo già in evo-devo.

Il terzo episodio, ultimo nel tempo ma certo non per importanza, è stato l'incontro con Pietro Omodeo, il mio professore di zoologia all'Università di Padova e, soprattutto, il relatore della mia tesi di laurea. Da lui, e dalle molte ore passate insieme a discutere sui temi più diversi, non solo di biologia animale, ho imparato a guardare al mondo naturale in chiave storica, in termini di cambiamento. Di cambiamento alla scala dell'individuo (ontogenesi, sviluppo) e di cambiamento a livello della specie (evoluzione). Che queste due dimensioni del cambiamento dovessero prima o poi integrarsi in una biologia evuzionistica dello sviluppo, era un'esigenza crescente, a quell'epoca, e non solo per me; molto tempo tuttavia sarebbe dovuto passare prima che essa trovasse finalmente soddisfazione.

2. Il biologo Ernst Mayr, nelle pagine di un interessante saggio pubblicato nel 2000 su "Scientific American" dal titolo "Darwin's Influence on Modern Thought" e basato sulla conferenza tenuta il 23 settembre del 1999 a Stoccolma in occasione della consegna del premio Crafoord assegnatogli dall'Accademia reale delle scienze svedese, scrive: «La scoperta dell'azione della selezione naturale, da parte di Darwin e Alfred Russel Wallace, deve essere considerata essa stessa uno straordinario progresso filosofico. Il principio era rimasto sconosciuto per oltre duemila anni di storia della filosofia, dai greci a Hume, a Kant e all'epoca vittoriana. Il concetto di selezione naturale spiegava con straordinaria efficacia i cambiamenti adattativi orientati in una particolare direzione. La sua natura è la semplicità stessa». Le principali tesi darwiniane (non fissità delle specie, evoluzione ramificata, gradualismo dell'evoluzione, selezione naturale) hanno trovato piena conferma. La teoria dell'evoluzione è oggi un dato di fatto. La vulgata del meccanismo dell'evoluzione ossia della teoria della selezione naturale si basa su «l'esistenza di un programma genetico ereditabile, dal quale dipendono le

caratteristiche di tutti gli organismi». Cosa c'è di scorretto in questa vulgata?

Anche se è impossibile negare che i geni – o, meglio, i loro prodotti – abbiano importantissime funzioni di controllo sullo sviluppo di un organismo e sull'esercizio delle sue attività quotidiane, conviene prendere le distanze da una visione del vivente troppo strettamente centrata sul gene. Una simile correzione di tiro non è rilevante solo dal punto di vista della biologia dello sviluppo, o della fisiologia. Essa può avere una profonda ricaduta anche sul nostro modo di descrivere, analizzare e interpretare i processi evolutivi.

In primo luogo, oggi sappiamo che i geni non sono sempre e pienamente responsabili dei processi ontogenetici. In molti casi, lo sviluppo di un organismo può prendere strade diverse, a seconda – per esempio – della quantità o della qualità delle risorse alimentari disponibili, o di particolari valori di temperatura o di illuminazione a cui viene esposto durante una più o meno lunga fase sensibile. Farò qualche esempio.

La farfalla *Araschnia levana*, una piccola vanessa dell'Europa centrale, compie due generazioni per anno, molto diverse tra loro nel disegno delle ali, tanto da essere state erroneamente considerate, in passato, come due specie differenti. Le differenze di colorazione fra le due generazioni non sono dovute a differenze genetiche, bensì all'influenza del fotoperiodo (la lunghezza relativa del giorno e della notte) in una fase critica dello sviluppo larvale.

Secondo esempio. In molti scarabei, il maschio è provvisto di corna, sulla testa o sul torace. In qualche specie, i maschi più grandi hanno corna molto lunghe, quelli più piccoli corna assai più brevi, e non esistono individui intermedi. In questo caso, la responsabilità del polimorfismo va all'alimentazione: più cibo, dimensioni maggiori, sia del corpo che delle corna, e viceversa.

Terzo esempio. Nell'alligatore e in altri rettili, il sesso non è determinato al momento della fecondazione, in base alla particolare combinazione di cromosomi sessuali che si viene a costituire con l'apporto dei due gameti. In questi animali, il sesso dipende invece dalla temperatura alla quale si trovano esposte le uova durante un breve periodo sensibile dello sviluppo embrionale. Nell'alligatore, in particolare, sotto i 30°C si sviluppano solo femmine, sopra i 34°C solo maschi.

3. Charles Darwin diede vita alla biologia evuzionistica, una scienza che viene definita storica per il carattere di unicità, o di irripetibilità, che

hanno i processi che questa scienza indaga, e così le specie (o gli adattamenti di queste) che ne sono il prodotto. Le sue idee e le sue intuizioni consentirono alla nuova branca delle scienze biologiche di non restare confinata all'interno di recinti in cui spesso le discipline rimangono, purtroppo, prigioniere. Le idee alle quali mi riferisco sono le quattro intuizioni darwiniane precedentemente menzionate che possono essere annoverate tra le cause teoriche della fondazione di una branca della filosofia della scienza, ossia la filosofia della biologia. Che cos'è la filosofia della biologia? Quali sono secondo te le specifiche potenzialità, come le definisce David Lee Hull nel saggio "What the philosophy of biology is not" (1969), che la filosofia ha in sé e che potrebbero offrire un contributo fattivo alla scienza della vita? Puoi fare un cenno allo sviluppo di una delle implicazioni filosofiche della scienza, come ad esempio il naturalismo nella spiegazione della "natura" umana?

Per un biologo, questa domanda è un invito ad avventurarsi su un terreno pieno di attrattiva, ma potenzialmente scivoloso. Mi limiterò pertanto a pochi aspetti, tutti legati alla biologia nel suo rapporto con la filosofia, anche se alcune di queste osservazioni sono generalizzabili ad altre scienze e alle rispettive implicazioni filosofiche.

Moltissimi problemi sono legati alla nozione di genere naturale, o *natural kind*. Se guardiamo indietro, nella storia degli studi biologici, questa nozione sembra applicarsi benissimo al mondo vivente. Pensa al *Systema naturae* di Linneo, alle sue specie immutabili che sono lì da sempre e attendono solo che il naturalista le individui e le battezzi, realizzando una sorta di pellegrinaggio attraverso la creazione: *species tot sunt diversae quot diversas formas ab initio creavit infinitum Ens*. E da sempre – o, meglio, fuori del tempo – ci sono dei generi naturali corrispondenti alle categorie che noi usiamo per descrivere la natura. Come la specie, appunto, oppure l'individuo.

Forse, però, le cose stanno altrimenti. Le specie cambiano nel tempo, ci ha insegnato Darwin: si evolvono, senza che sia possibile fissare in un preciso istante nel tempo il momento in cui la specie ancestrale cessa di esistere e al suo posto compare invece la nuova specie in cui la prima si è evoluta. Quanto sia problematica l'individualità, lo hanno mostrato da sempre i vitelli a due teste oppure – e in modo assai più drammatico – quelle coppie di gemelli umani che oggi chiamiamo siamesi, parzialmente congiunti nei modi più diversi e strazianti. Ma non ci si può fermare qui.

Quanto alle specie, non dobbiamo solo accettare che esse non sono immutabili, ma dobbiamo anche inserire nella nostra visione del mondo

naturale il fatto che non tutti gli esseri viventi sono organizzati in specie, allo stesso modo in cui nella specie umana, accanto a moltitudini organizzate in stati o in tribù, esistono anche singoli individui, o piccolissimi gruppi, che non si lasciano ricondurre né alla logica della tribù né a quella dello stato. Al pari delle singole specie, anche la stessa esistenza di individui organizzati in specie è un prodotto della storia, un prodotto raggiunto più volte e molte volte perduto, senza per questo arrivare all'estinzione. Accanto a noi ci sono molti animali e molte piante che non possono essere descritti in termini di specie se non in modo del tutto arbitrario.

Quanto all'individuo, la biologia ha offerto alla filosofia la possibilità di utilizzare molti criteri definitivi, oltre a quello della separazione fisica fra un individuo e l'altro. Criteri derivanti, ad esempio, dall'unicità genetica o da quella immunitaria. Tuttavia, nessuno di questi criteri ha dimostrato portata universale e, quel che è peggio, le partizioni ottenute dall'applicazione di criteri diversi ritagliano, nel mondo dei viventi, quadri diversi di individualità.

Che fare, in queste situazioni? Il biologo dovrà imparare a non usare termini come specie o individuo (oppure gene, omologia, generazione, sviluppo, adulto e molti altri) senza chiedersi se con uno di questi termini sta proprio indicando le stesse cose che vanno sotto lo stesso nome nei discorsi o negli scritti dei suoi colleghi (o dei filosofi!). Al filosofo, dal canto suo, converrà aggiornare i suoi rapporti con il biologo: da un lato, frequentarlo più spesso, per conoscere un poco quella diversità del vivente che comprende stati e fenomeni ben diversi da quel mondo fatto di umani (o, comunque, da mammiferi o da vertebrati) sul quale non pochi concetti filosofici sono ritagliati, ma che male si applicano ad altre forme viventi; dall'altro, prendere le distanze dall'idea di usare la storia naturale come banco di prova sul quale saggiare la validità delle sue nozioni, soprattutto di quelle che hanno rilevanza per l'etica o per il diritto. Ad esempio, se chiediamo a un biologo di fissare con precisione il momento in cui ha inizio (o fine) la vita di un individuo, la risposta più onesta che ne potremo ricevere sarà: a seconda del criterio che intendiamo applicare, questo momento può essere fissato con buona precisione, ma non può essere la scienza a dirci quale criterio è più opportuno scegliere.

A dispetto del titolo dell'opera maggiore di Darwin, e delle attese di molti (inclusi non pochi filosofi), nella scienza, credo, non c'è posto per domande sulle origini, ma solo per un'indagine sul divenire, sulle trasformazioni – dalle più rapide alle più lente – che interessano i sistemi

naturali. Con pieno rispetto per la filosofia, se ritiene che delle origini può e deve occuparsi.

Quanto ai generi naturali, per tornare alla questione da cui ero partito, mi sembra chiaro che le scienze della natura li hanno mandati in pensione. Ciò ha senza dubbio delle implicazioni di una certa portata per la filosofia. Se non esistono i generi naturali (o, per lo meno, se questi non si applicano alla nostra lettura del mondo dei viventi), cosa resta di una nozione come ‘natura umana’? Sinceramente, non saprei quale significato attribuire a questa espressione.

4. Le idee che caratterizzano la teoria darwiniana modificarono profondamente e irreversibilmente il modo in cui gli esseri umani pensavano a loro stessi e agli altri fenomeni della natura e apparvero in forte opposizione rispetto alle concezioni del mondo. Negli ultimi trent'anni una delle discipline biologiche che si è imposta sia all'attenzione dei ricercatori che a un pubblico di non addetti ai lavori è l'evo-devo, un acronimo che sta per "Evolutionary Developmental Biology". L'Europa ha dato il via agli studi in questo settore che possiamo definire rivoluzionario. È datato 1999 l'editoriale della rivista "Evolution & Development" in cui si tenta di offrire al lettore una prima definizione di evo-devo: «una strana disciplina... fluida e sintetica». Nel 2005 si svolse a Venezia il primo convegno europeo promosso proprio da te. E, sempre nello stesso anno, nacque la European Society for Evolutionary Developmental Biology. Qual è l'origine di questo settore di ricerca?

L'espressione *evolutionary developmental biology*, cioè biologia evoluzionistica dello sviluppo, entra nell'uso comune nei primi anni '90 dello scorso secolo, quando esce la prima edizione del libro di Brian K. Hall che porta proprio questo titolo.

Per quanto strano possa sembrare, fino a quel momento il dialogo fra la biologia evoluzionistica e la biologia dello sviluppo era stato molto limitato. Gli studiosi delle due discipline pubblicavano su riviste diverse, frequentavano congressi separati e, soprattutto, si ponevano domande differenti. Di fatto, si ignoravano a vicenda, a volte anche in maniera deliberata.

Per comprendere meglio le ragioni di questa separazione, dobbiamo fare un passo indietro e tornare alla prima metà del '900. A partire dagli anni '30, un gruppo di autorevoli scienziati – in particolare, Thomas Hunt Morgan, Ronald Aylmer Fisher, Theodosius Dobzhansky, John Burdon Sanderson Haldane, Sewall Green Wright, William Donald Hamilton, Cyril

Darlington, Julian Huxley, Ernst Mayr, George Gaylord Simpson George, Ledyard Stebbins e, più tardi, Motoo Kimura – diede forma alla cosiddetta *Sintesi moderna*. Questa spesso è chiamata, impropriamente, Neodarwinismo, un termine che andrebbe meglio applicato all'evoluzionismo di August Weismann, che a fine Ottocento negò la possibilità di un'eredità dei caratteri acquisiti, restringendo alla sola selezione naturale il ruolo di agente causativo dell'evoluzione.

Con la Sintesi moderna prendeva forma un programma di ricerca all'interno del quale, oltre all'idea di evoluzione per selezione naturale, coesistevano sia le discipline 'classiche' della tradizione naturalistica, come la paleontologia, la sistematica e l'anatomia comparata, sia la genetica, che aveva cominciato a svilupparsi all'inizio del Novecento, dopo la riscoperta del lavoro di Mendel. La disciplina che più ha contribuito a questa sintesi è stata la genetica delle popolazioni: solo comprendendo come cambiano le popolazioni a livello genetico era possibile affrontare il problema del modificarsi delle forme viventi nel tempo e tentare un aggancio con quello che i paleontologi trovano negli strati geologici. Dando per acquisito che i geni controllano ciò su cui agisce l'evoluzione, cioè il fenotipo (l'organismo vivente nelle sue peculiarità strutturali e funzionali), lo sviluppo, che riguarda invece il *modo* in cui i geni contribuiscono a realizzare l'organismo, non veniva considerato fondamentale. I motivi erano anche di natura tecnica: a quel tempo lo sviluppo era una sorta di scatola nera dentro la quale non era possibile vedere i geni in azione, perché mancavano i mezzi per farlo. Ora però le cose sono cambiate, possiamo aprire questa scatola nera e capire non solo la sopravvivenza del più adatto (*survival of the fittest*), come ci suggerisce la biologia evoluzionistica, ma anche *l'arrivo* del più adatto (*arrival of the fittest*), cioè come è possibile costruire, attraverso lo sviluppo, i diversi fenotipi che, una volta realizzati, saranno poi sottoposti al vaglio della selezione.

Alla fine, ci siamo resi conto che alcuni importanti problemi della biologia, per esempio le strade attraverso le quali emergono le cosiddette novità evolutive, come il fiore delle piante o l'ala degli uccelli, potevano essere affrontati solamente se si prendevano in considerazione sia la biologia evoluzionistica, sia la biologia dello sviluppo.

5. Come abbiamo già ricordato, la biologia evoluzionistica è una scienza storica. Per offrire una spiegazione degli eventi che aderisca quanto più possibile alla realtà, gli esperimenti e il richiamo a leggi non sembrano essere strumenti euristici appropriati ed efficaci. Quel che serve al biologo evoluzionista è la capacità di ricostruire gli eventi da un punto di vista

storico offrendo scenari possibili di spiegazione. L'esempio più famoso che descrive Mayr nel già citato saggio del 2000 è quello che fa riferimento all'estinzione dei dinosauri: "Per spiegare l'improvvisa estinzione dei dinosauri alla fine del Cretaceo, sono stati proposti tre diversi scenari: un'epidemia devastante, un catastrofico cambiamento del clima, l'impatto di un asteroide con la Terra: ipotesi, quest'ultima, nota come «teoria di Alvarez». I primi due scenari furono alla fine accantonati per l'emergere di testimonianze incompatibili con essi, mentre tutti i fatti noti trovano una loro collocazione nella teoria di Alvarez, oggi ampiamente accettata". Il modo di lavorare dei biologi evuzionisti fa emergere una riflessione che credo sia importante per il discorso che stiamo tentando di sviluppare. Il fatto che le descrizioni storiche siano sottoposte a verifica implica che la separazione, che da più parti si cerca di ampliare, fra discipline scientifiche e umanistiche, in realtà è fine a se stessa. La metodologia adottata dalla biologia evuzionistica e l'ingresso nell'indagine naturalistica di un importante fattore, ossia quello temporale, ha consentito alla biologia evuzionistica di costruire un ponte che unisca i due domini. Una volta ridimensionato il Rubicone tra scienze della natura e scienze dello spirito, puoi spiegarci quale è l'utilità della multidisciplinarietà e indicarci le discipline che hanno contribuito maggiormente alla nascita di evo-devo?

L'esigenza di multidisciplinarietà, oggi così largamente sentita, è in buona misura una conseguenza dell'exasperata specializzazione che nei decenni scorsi si era affermata in questi tutti i campi del sapere, come necessità imposta dalla crescita esponenziale delle conoscenze e delle tecniche necessarie per il loro progresso e per le loro applicazioni. L'eccessiva specializzazione rende improbabile l'acquisizione, per lo meno a tempi brevi, di risultati utili ottenuti in altri campi, anche in quelli disciplinarmente più vicini, e soprattutto rende difficile l'emergere di nuove dimensioni di pensiero e d'indagine. Ecco dunque la necessità di un periodico rimescolamento delle carte che può avvenire solo attraverso un rilassarsi dei confini fra le discipline. Gli effetti positivi della multidisciplinarietà sono ovvi, come c'era da aspettarsi, anche nelle scienze della vita, nell'ambito delle quali l'esempio più attuale di multidisciplinarietà è dato proprio dall'emergere della biologia evuzionistica dello sviluppo.

In una prima fase, i progressi più significativi in evo-devo sono arrivati dalla genetica dello sviluppo, cioè dallo studio dei meccanismi d'azione dei geni che guidano il passaggio dallo zigote all'adulto. Intorno al 1980, un gruppo di scienziati tra i quali Christiane Nüsslein-Volhard ed Eric F. Wieschaus, che per questi studi riceveranno il Premio Nobel nel 1995, si

mise a studiare sistematicamente alcuni bizzarri mutanti del moscerino della frutta (*Drosophila melanogaster*). Fra i milioni di individui di questo organismo modello allevati nei laboratori, si osservavano a volte degli individui che, per esempio, avevano un paio di zampe al posto delle antenne, oppure un paio di ali in più. I ricercatori scoprirono che l'aspetto di questi mutanti era dovuto a mutazioni in singoli geni, ma come poteva un solo gene contenere le informazioni necessarie per costruire qualcosa di complesso come l'ala di un insetto? La risposta è che questi geni, chiamati geni *Hox*, non fanno tutto da soli; è, infatti, solo attraverso il loro ruolo di controllo sull'espressione di molti altri geni che essi determinano, per esempio, il tipo di appendici che si formeranno su un determinato segmento del torace del moscerino. In seguito si è scoperto che i geni *Hox*, in tutto una decina o poco più, sono sostanzialmente gli stessi in quasi tutti gli animali e che nell'evoluzione si è conservata anche la loro funzione principale, quella di identificare nell'embrione la posizione in cui l'espressione di altri geni porterà allo sviluppo delle diverse strutture. Tutto questo ci dice che esiste una sintassi del corpo condivisa, uno schema corporeo comune a tutti gli animali al quale nel 1993 Jonathan M. W. Slack, Peter W. H. Holland e C. F. Graham hanno dato il nome di *zootipo*.

Anche dalla morfologia comparata sono arrivati contributi importanti nel campo dell'evo-devo. Per fare un esempio, è un dato di fatto che tutti i centopiedi hanno un numero dispari di segmenti del corpo. All'interno dell'ordine degli scolopendromorfi questo numero può essere 21 o 23, ma nel 1998 ho descritto, assieme a due colleghi, una specie brasiliana dove il numero di segmenti è, invece, 39 o 43. Abbiamo chiamato questa specie *Scolopendropsis duplicata* e la cosa più interessante dal punto di vista dell'evo-devo è che nell'evoluzione dei centopiedi sembra sia possibile raddoppiare il numero di segmenti (o quasi, perché il numero totale viene comunque mantenuto dispari) ma non aumentare la lunghezza del corpo aggiungendo un segmento alla volta. Esiste, dunque, un vincolo dello sviluppo che non possiamo ignorare, se vogliamo capire l'evoluzione di questi animali.

6. *In un tuo articolo apparso sul Sole 24 ore, scrivi: "La storia evolutiva delle forme viventi è un tortuoso percorso nel labirinto dei cambiamenti possibili". Perché possibili?*

Perché non tutte le forme che noi possiamo immaginare sono possibili e, soprattutto, perché fra le moltissime forme possibili alcune sono molto più probabili di altre. Ed è qui che scopriamo le cose più interessanti.

Facciamo un esempio. La giraffa ha un lungo collo, utile per brucare le foglie dai rami più alti, dove ancora rimane qualcosa di verde anche nella stagione in cui tutta l'erba della savana è secca; i maschi, inoltre, lo usano anche per combattere tra loro, come fanno i maschi dei cervi con i loro palchi. Si può ben capire, pertanto, il vantaggio adattativo che il lungo collo procura a questi animali. C'è tuttavia un problema: come si fa a costruire un collo così lungo?

Limitiamoci qui a considerare solo un aspetto della questione, vale a dire come realizzare un supporto scheletrico adeguato mediante le vertebre cervicali. In teoria, per dare sostegno ad un collo sempre più lungo ci sono tre possibilità: o si allungano le vertebre, o se ne aumenta il numero, o si fanno entrambe le cose. Cosa sarà successo lungo la linea evolutiva delle giraffe? Da sola, la biologia evuzionistica non ci permette di fare previsioni al riguardo, perché, dal punto di vista adattativo, quello che conta è avere un collo lungo, non importa se questo è stato ottenuto variando il numero oppure la lunghezza delle vertebre. Di fatto, quando andiamo a studiare lo scheletro della giraffa scopriamo che il collo di questo animale è sostenuto da sette vertebre, molto allungate. Questo non è un numero qualsiasi, perché quasi tutti i mammiferi, dall'uomo al cavallo all'ippopotamo, hanno sette vertebre cervicali. Come mai? Perché, per ragioni che ancora conosciamo solo in maniera molto imperfetta, una variabilità nel numero di vertebre cervicali è praticamente esclusa, mentre sulla forma di queste ossa, compreso il loro grado di allungamento, non esistono vincoli stretti. L'evoluzione per selezione naturale non può prendere tutte le strade teoricamente possibili, ma solo quelle permesse dalla variabilità disponibile e dalle diverse forme che possono essere prodotte dai meccanismi di sviluppo. Possiamo qui introdurre una nozione centrale in evo-devo, che va sotto il nome di *evolvibilità* (*evolvability* in inglese), che si può definire come il quadro complessivo delle strade che possono essere imboccate dall'evoluzione a partire dalle condizioni attuali.

Facciamo un paragone con il gioco degli scacchi. Ogni pezzo può muoversi solamente per andare in certe posizioni: i suoi spostamenti, cioè, sono soggetti a vincoli, proprio come il processo di sviluppo che dà forma a un organismo. Ovviamente, fra i diversi spostamenti possibili ce ne saranno di vincenti e di perdenti, ma ogni mossa è comunque vincolata, prima che dalla scelta strategica del giocatore, dalla rosa delle possibilità che le regole del gioco gli lasciano aperte. A mano a mano che la partita va avanti, ai vincoli specifici ai quali è soggetto ogni pezzo si sommano quelli determinati dalla posizione degli altri pezzi sulla scacchiera, che nella nostra

metafora rappresentano l'ambiente in cui gli organismi lottano per la sopravvivenza.

Forse vale la pena di aggiungere che in questo gioco dei possibili il biologo dà per scontati alcuni vincoli che derivano dalla natura delle molecole di cui sono fatti i viventi e dalle proprietà fisiche della materia nelle condizioni ambientali (ad esempio, valori di temperatura e di pressione) che si verificano sulla superficie del nostro pianeta. Nessuna pretesa di considerare come assoluto il confine fra possibile e impossibile.

7. Perché non si possono essere evoluti centauri o sirene?

Le forme dei viventi non si fanno e disfanno a capriccio. Centauri e Sirene, nel cui corpo si sommano parti di creature diverse, rimangono confinati nel mondo del fantastico. Al mondo reale appartengono, invece, i vitelli a due teste e le drosofile con un paio di zampe al posto delle antenne.

Nel caso dei vitelli, le due teste, complete o meno che siano, sono eguali tra loro (e, dunque, sono legittime teste di vitello) e la loro posizione non è casuale, ma rispecchia rigorosamente la simmetria dell'intero animale. Nel caso delle drosofile, le zampe soprannumerarie che in certi mutanti prendono il posto delle antenne sono comunque zampe di drosofila, fino all'ultimo pelo. Anche i mostri rispettano delle leggi. Anzi – e questo fatto ha aperto alla biologia straordinarie possibilità di indagine sperimentale – le leggi alle quali sono soggetti i mostri sono le stesse che regolano lo sviluppo degli individui normali. Si noti il duplice scandalo: vitelli a due teste e drosofile con quattro ali sembrerebbero creature impossibili, eppure la natura è in grado di realizzarle; scolopendre con 22 paia di zampe sembrerebbero una banale variante delle più comuni scolopendre con 21 paia di zampe, ma la natura non è capace di fabbricarle. Ecco dunque dove possiamo rivolgere l'attenzione, nella nostra indagine sui confini tra le forme possibili e le forme impossibili: a quelle regole della cui esistenza cominciamo a sospettare quando le nostre attese vengono così clamorosamente smentite.

Le forme di tutti gli animali e le piante esistenti sono in accordo con un piccolo numero di schemi architettonici principali emersi lungo la storia della vita. Curiosamente, queste 'regole della forma' sono rispettate in misura considerevole anche dai prodotti dell'immaginazione che troviamo nel mito e nelle rappresentazioni artistiche, come chimere, centauri, sirene, angeli e draghi. La principale eccezione a questa regola è la frequente aggiunta di un paio di appendici extra, ad esempio due ali sulle spalle di una figura umana o sul dorso di una bestia a quattro zampe. Ricordiamoci,

infatti, che le ali degli uccelli, e così quelle dei pipistrelli, non sono un'aggiunta al piano strutturale di un quadrupede, bensì il risultato di una modificazione del paio anteriore delle sue quattro appendici locomotorie; pertanto, agli uccelli e ai pipistrelli è rimasto solo un paio di zampe, quello posteriore, con cui camminare o aggrapparsi a un sostegno.

L'artista sconosciuto dalle cui mani è uscita la chimera d'Arezzo non aveva certo alcuna preoccupazione per i problemi di rigetto che, come ben sappiamo oggi, avrebbero portato al fallimento degli improbabili trapianti, per non parlare della mancanza di un meccanismo biologico plausibile con il quale parti di corpi di leone, capra e serpente potrebbero trovarsi ad essere congiunte in un solo corpo. Tuttavia, l'artista ha rispettato in pieno la simmetria bilaterale, mentre avrebbe potuto congiungere in altri modi le parti eterogenee del mostro. Ha inoltre rispettato la sua polarità antero-posteriore, almeno nell'orientamento della testa di capra rispetto al corpo del leone: solo la coda anguina suggerisce un'improbabile inversione di polarità. Ci sono, quindi, regole formali comuni condivise dalle creature esistenti e dalle produzioni immaginarie del mito e dell'arte.

8. Dalle tue parole non sembrerebbe poi tanto lontano dalla realtà affermare che nella natura esiste una vera e propria sintassi dei corpi che accomuna gli organismi viventi. Quello che ti chiedo, arrivati a questo punto del nostro ragionamento, è che fine fa l'omologia, abitualmente definita come «la corrispondenza che esiste tra due strutture di organismi diversi, nella misura in cui esse sono riconducibili alla struttura del loro ultimo antenato comune»? Che genere di revisione subisce questo concetto?

Il concetto di omologia nasce, a dire il vero, prima di Darwin e, quindi, al di fuori di ogni riferimento alla genealogia, ai rapporti di parentela fra le specie. La nozione compare già – sebbene sotto altro nome – negli scritti dei grandi studiosi di anatomia comparata del primo Ottocento, in particolare in quelli di Etienne Geoffroy Saint-Hilaire e di Georges Cuvier. Poco più tardi, un altro grande anatomo comparato (e paleontologo), Richard Owen, introduce il termine *homologue* per indicare, secondo la sua definizione del 1843, *the same organ in different animals under every variety of form and function*.

Un esempio classico di organi omologhi è dato dall'arto superiore dell'uomo a confronto con l'ala di un pipistrello o con la zampa anteriore di un cavallo. Ma se prendessimo in esame il mutante di *Drosophila* con le zampe al posto delle antenne e ci chiedessimo a cosa sono omologhe quelle zampe, come dovremo rispondere? Dal punto di vista della posizione, le

zampe sulla testa del mutante sono omologhe alle antenne di una mosca normale, mentre dal punto di vista della struttura sono omologhe a una qualsiasi altra zampa di *Drosophila*. Questo è un esempio estremo che ci permette di capire che la relazione di omologia non può essere trattata in termini di tutto-o-niente, ma come il risultato di un complesso sistema combinatorio, le cui componenti è necessario specificare di volta in volta.

Se ora abbandoniamo il linguaggio pre-evoluzionistico di Owen e rileggiamo queste omologie in chiave storica, evoluzionistica, ci rendiamo facilmente conto dell'importanza di un approccio evo-devo a questi problemi. Anche nel caso, in apparenza più semplice, dell'omologia fra l'arto superiore dell'uomo, l'arto anteriore di un cavallo e l'ala di un uccello, ci possiamo chiedere, per esempio, quale sia il grado di indipendenza con cui possono evolversi le due paia di arti dei vertebrati quadrupedi. L'esempio dell'uomo e, soprattutto, quello dell'uccello (o del pipistrello) sembrerebbero suggerire una notevole autonomia, ma non dobbiamo dimenticare che a fronte di questo rimangono fermi dei vincoli molto importanti. Non è solo vero, infatti, che – a parte qualche dettaglio nel numero delle dita o delle loro falangi – il nostro arto superiore e l'ala dell'uccello o del pipistrello hanno esattamente la stessa struttura scheletrica dell'arto anteriore del cavallo, ma questa – a sua volta – ha una precisa corrispondenza con quella dell'arto posteriore dello stesso animale. Nel cavallo, come nell'uccello o nell'uomo, c'è una precisa *omologia seriale* fra omero e femore, fra radio+ulna e tibia+fibula, etc., fino alle falangi delle dita. Dunque, se l'arto anteriore e quello posteriore sono così simili tra loro da conservare la stessa impalcatura scheletrica anche quando il paio anteriore si modifica profondamente nella forma e nella funzione, cosa permette a quest'ultimo di variare, mentre il paio posteriore si dimostra assai più conservativo? Interrogativi di questo tipo ci portano ad affrontare quella che oggi viene chiamata la *modularità* dei processi di sviluppo, una nozione che diventa ancor più utile quando affrontiamo lo studio dei mutanti di drosophila con un paio di zampe al posto delle antenne, nei quali un modulo (zampa, antenna) può essere eliminato, oppure inserito o sostituito, conservando però tutta la sua specifica struttura, e dove le diverse posizioni nell'architettura del corpo sembrano avere una loro precisa identità fino al punto da rimanere omologhe anche se ospitano moduli anatomici differenti.

9. Evo-devo ha permesso a due classi di biologi di dialogare tra loro. Mi riferisco ai biologi dello sviluppo e ai biologi che si occupano di evoluzionismo. Puoi definire i termini di questo dialogo?

Quando uno studioso di biologia evuzionistica si domanda: perché questa farfalla ha quattro ali? - i suoi quesiti si calano in un contesto di storia evolutiva e di adattamento all'ambiente. Egli cercherà, ad esempio, di ricostruire il piano strutturale delle prime farfalle e di formulare un'ipotesi circa le sue ali: erano quattro già allora? Se sì, erano quattro perché le prime farfalle ereditarono quattro ali dai loro più prossimi antenati, o si è trattato invece di un'invenzione delle farfalle, derivando queste da antenati senz'ali o con un numero di ali diverso da quattro?

Per il biologo dello sviluppo, chiedersi perché mai la farfalla ha quattro ali e perché queste sono ricoperte da certi disegni, significa invece indossare il camice e indagare, a livello cellulare e molecolare, sui meccanismi di sviluppo per cui un bruco vermiforme e senz'ali si trasforma prima o poi in un insetto adulto provvisto di ali; e sui meccanismi molecolari che fanno sì che un paio di ali si formi soltanto a carico del secondo e del terzo dei tre segmenti del torace, e non sul primo, né su alcuno dei segmenti addominali.

10. Alcuni filosofi della scienza hanno ritenuto di poter presentare evodevo come una radicale alternativa alla Sintesi Moderna (ed allo stesso darwinismo). È così?

Da diversi anni, ormai, non sono pochi i biologi e, soprattutto, i filosofi della biologia che si chiedono se non sia ormai venuta l'ora di aggiornare la Sintesi moderna, in particolare proprio per includervi quello che avviene nella scatola nera dello sviluppo, che ne era stata lasciata fuori fin quasi alla fine del secolo scorso. Alcuni, fra questi studiosi, ritengono che proprio i risultati della biologia evuzionistica dello sviluppo richiedano una nuova lettura dei processi evolutivi. La mia posizione è diversa.

Innanzitutto, dobbiamo metterci d'accordo su cosa vogliamo intendere per Sintesi moderna. È ben vero che le posizioni rappresentate, ad esempio, da Richard Dawkins e comunemente prese come esemplari dell'evoluzionismo secondo la Sintesi moderna, riconoscono solo alla selezione naturale (con un ruolo accessorio attribuito ad un fenomeno casale come la deriva genetica) la capacità di determinare il cambiamento evolutivo. È anche vero, però, che questa posizione rigida non è l'unica fra le diverse versioni dell'evoluzionismo secondo la sintesi moderna, né quella dei suoi padri fondatori. Se leggiamo quello che scriveva Julian Huxley in *Evolution: the modern synthesis* (1942), troviamo in realtà che i temi della biologia dello sviluppo applicata all'evoluzione erano già presenti. Lo stesso accadeva negli scritti di Haldane. Questo significa che al momento della definizione della Sintesi, nonostante le conoscenze molto limitate,

l'importanza dello sviluppo era ben nota. Non c'è dubbio, però, che la versione 'scolastica' della teoria dell'evoluzione, che continua a essere insegnata sotto il nome di Sintesi moderna, non deve più essere presentata come il modello completo e definitivo dei processi evolutivi.

11. Evo-devo è, dunque, un'alternativa alla teoria dell'evoluzione per selezione naturale?

Rasmus Grønfeldt Winther, filosofo della scienza che lavora presso l'University of California a Santa Cruz, ha recentemente definito evo-devo come una *trading zone*, un'area di scambio fra discipline diverse. Questa interpretazione è forse riduttiva, poiché evo-devo ha una problematica propria, come quella che ruota attorno al concetto di *evolvability*, che non appartiene di diritto né alla biologia evoluzionistica né alla biologia dello sviluppo (o ad altra disciplina, come la genetica delle popolazioni). Winther, tuttavia, ha colto un aspetto che sembra essere sfuggito a molti, e dal quale secondo me deriva la ricorrente affermazione, secondo la quale la biologia evoluzionistica dello sviluppo sarebbe un'alternativa alla teoria dell'evoluzione per selezione naturale.

Questo, molto semplicemente, perché evo-devo non è una nuova versione della biologia evoluzionistica (così come, naturalmente, non è una nuova versione della biologia dello sviluppo). Attraverso evo-devo (e non solo), stiamo invece muovendoci verso una nuova biologia, molto più integrata rispetto all'impostazione che ancora domina nei nostri libri di testo. Una biologia in cui c'è spazio per i problemi dei quali si è occupata fino ad oggi la biologia evoluzionistica, così come per quelli che sono stati il tradizionale oggetto di studio della biologia dello sviluppo. La biologia evoluzionistica dello sviluppo ha già avuto, e certamente avrà nel prossimo futuro, ricadute importanti sia sul fronte dell'evoluzione che su quello dello sviluppo. Una visione unilaterale, che tende a leggere tutta la biologia *solo* in chiave evoluzionistica, mi sembra riduttivo e scorretto. Per concludere: sono d'accordo sul fatto che abbiamo già cominciato a muoverci verso una nuova sintesi, ma non si tratta di una nuova visione dell'evoluzione, bensì di una nuova visione della biologia, all'interno della quale – anche grazie a evo-devo – i fenomeni evolutivi vengono messi più strettamente in relazione con le dinamiche dello sviluppo, e con altro ancora.

12. Spiegaci meglio un'affermazione presente in "Forme del divenire". Tu scrivi che ciascun organismo deve essere considerato come «il risultato, contingente e provvisorio, di una storia che forse andrà avanti». Ed ancora:

«La natura non ha un progettista che possa sbizzarrirsi in esercizi di libera creazione. Deve sempre partire da ciò che ha già imparato a produrre e che, almeno fino ad oggi, ha dato buona prova di sé».

È un suggerimento per una visione storica e dialettica dei viventi. Storica, perché ogni nuovo evento – lo sviluppo di un individuo così come il modificarsi evolutivo di una popolazione – dipende in maniera molto stretta dalla storia precedente, per lo meno da quella più recente, anche se in un modo che non è totalmente determinato dall’eredità – genetica o altro – che viene dal passato. Dialettica, perché fra sviluppo ed evoluzione vi è un continuo rimbalzare di condizionamenti. Da un lato, la selezione naturale può operare solo all’interno delle forme biologiche effettivamente realizzate, cioè sulle forme che si sono prodotte attraverso lo sviluppo. Dall’altro, lo sviluppo non può che attuarsi entro i vincoli, materiali e formali, di ciò che nel processo evolutivo è risultato vincente. E così via, di generazione in generazione. Ricordando, tuttavia, che la selezione naturale non agisce solo sugli adulti, ma su qualunque stadio di sviluppo la cui sopravvivenza e il cui successo abbiano conseguenze sul successo riproduttivo.

13. Il titolo di un’intervista rilasciata a Piattelli Palmarini suona più o meno così: “Lo scienziato dello sviluppo che spinge la biologia oltre Darwin”. È così?

Se avessi potuto scegliere io il titolo da dare a quell’intervista per il *Corriere della sera*, di certo non avrei usato una simile espressione. E non solo per evitare un immodesto e ingenuo accostamento a Darwin, anche se alla fine si potrebbe giustificarlo facendo nostra l’osservazione attribuita a Bernardo di Chartres, che noi siamo dei nani sulle spalle dei giganti – capaci sì di guardare un po’ più in là di loro, ma proprio grazie a ciò che i nostri grandi predecessori ci hanno lasciato in eredità. Ciò che soprattutto non mi torna, in quel titolo, è la contrapposizione fra biologia dello sviluppo e biologia evoluzionistica, quasi che l’una sia più attuale o più efficace dell’altra. Le cose, in realtà, non stanno così.

Fino a che ciascuna perseguiva i suoi programmi di ricerca, senza preoccuparsi di quanto avveniva nel frattempo nel campo dell’altra, la biologia evoluzionistica e la biologia dello sviluppo hanno continuato, come dicevo prima, a formulare interrogativi diversi, senza entrare in un terreno comune dove ciascuna disciplina avrebbe potuto portare il proprio contributo di idee e di metodi d’indagine. Quando, finalmente, questo

incontro si è realizzato, fra biologia dello sviluppo e biologia evoluzionistica non è avvenuto uno scontro, bensì un'apertura di dialogo che si va facendo sempre più feconda. A mio avviso, il messaggio principale che emerge dall'attuale biologia evoluzionistica dello sviluppo non è “dimentichiamoci di Darwin”, bensì – riscrivendo la famosa frase di Theodosius Dobzhansky secondo cui nulla ha senso in biologia se non alla luce dell'evoluzione – “nulla ha senso in biologia se non alla luce della storia”, una storia che è insieme storia evolutiva, sulla scala dei tempi lunghi, e storia dello sviluppo, sulla scala dei tempi brevi.

Bibliografia

Hull D. L., 1969, «What philosophy of biology is not», *Synthese*, 20(2), pp. 157-184.

Huxley J., 1942, *Evolution: the modern synthesis*, Allen & Unwin, London.

Mayr E., 2000, «Darwin's Influence on Modern Thought», *Scientific American*, July, pp. 79-83.

Minelli A., 2009, *Perspectives in Animal Phylogeny and Evolution*, Oxford University Press, Oxford.

Minelli A., 2007, *Forme del divenire. Evo-devo: la biologia evoluzionistica dello sviluppo*, Einaudi, Torino.

Minelli A., 2003, *The Development of Animal Form*, Cambridge University Press, Cambridge.

Aphex.it è un periodico elettronico, registrazione n° ISSN 2036-9972. Il copyright degli articoli è libero. Chiunque può riprodurli. Unica condizione: mettere in evidenza che il testo riprodotto è tratto da www.aphex.it

Condizioni per riprodurre i materiali --> Tutti i materiali, i dati e le informazioni pubblicati all'interno di questo sito web sono "no copyright", nel senso che possono essere riprodotti, modificati, distribuiti, trasmessi, ripubblicati o in altro modo utilizzati, in tutto o in parte, senza il preventivo consenso di Aphex.it, a condizione che tali utilizzazioni avvengano per finalità di uso personale, studio, ricerca o comunque non commerciali e che sia citata la fonte attraverso la seguente dicitura, impressa in caratteri ben visibili: "www.aphex.it". Ove i materiali, dati o informazioni siano utilizzati in forma digitale, la citazione della fonte dovrà essere effettuata in modo da consentire un collegamento ipertestuale (link) alla home page www.aphex.it o alla pagina dalla quale i materiali, dati o informazioni sono tratti. In ogni caso, dell'avvenuta riproduzione, in forma analogica o digitale, dei materiali tratti da www.aphex.it dovrà essere data tempestiva comunicazione al seguente indirizzo (redazione@aphex.it), allegando, laddove possibile, copia elettronica dell'articolo in cui i materiali sono stati riprodotti.

In caso di citazione su materiale cartaceo è possibile citare il materiale pubblicato su Aphex.it come una rivista cartacea, indicando il numero in cui è stato pubblicato l'articolo e l'anno di pubblicazione riportato anche nell'intestazione del pdf. Esempio: Autore, *Titolo*, <<www.aphex.it>>, 1 (2010).
